

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

**Vliv technologických parametrů na
topografii povrchu materiálu vytvořených
pulzujícím vodním paprskem**

**The influence of technological parameters
on the material surface topography created by
pulsating water jet**

Student:

Ondřej KLICH

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Jan VALÍČEK, Ph.D.

Ostrava 2009

Zadání bakalářské práce

Student: **Ondřej Klich**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **2303R002 Strojírenská technologie**
Téma: **Vliv technologických parametrů na topografii povrchu materiálu
vytvořených pulzujícím vodním paprskem
Influence of Technological Parameters on the Material Surface
Topography Created by a Pulsating Waterjet**

Zásady pro vypracování:

1. Prostudovat základní literaturu a provést literární rešerši.
2. Studium základů technologie pulzujícího vodního paprsku.
3. Nastudovat měřicí metody topografie povrchu.
4. Vytipovat hlavní technologické parametry pulzujícího vodního paprsku, které mají největší vliv na topografii povrchu.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BUMBÁLEK, B.; ODVODY, V.; OŠŤÁDAL, B. *Drsnost povrchu*. Praha, SNTL, 1989.
- [2] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pojmy, definice a parametry struktury povrchu*. 1997.
- [3] ČSN EN ISO 4288. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. 1997.
- [4] FOLDYNA, J.; SITEK, L.; ŠČUČKA, J.; MARTINEC, P.; VALÍČEK, J.; PÁLENÍKOVÁ, K. Effects of Pulsating Water Jet Impact on Aluminium Surface. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 20, 6174-6180, 2009.
- [5] MLČOCH, L.; SLIMÁK, I. *Řízení kvality a strojírenské metrologie*. Praha, SNTL, 1987.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jan Valíček, Ph.D.**

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Lenka Čepová, Ph.D.**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011



doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 23. května 2011



.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 23. května 2011



.....
podpis

Ondřej KLICH

1. Máje 410, Suchdol nad Odrou 742 01

Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Janu Valíčkovi, Ph.D. za cenné rady a metodické vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat RNDr. Mileně Kušnerové, Ph.D. za důležité připomínky.

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

KLICH, O. Vliv technologických parametrů na topografii povrchu materiálu vytvořených pulzujícím vodním paprskem. Ostrava: Katedra obrábění a montáže, Fakulta strojní, VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2011, 37 s. Bakalářská práce, vedoucí VALÍČEK, J.

Bakalářská práce se věnuje principu technologie pulzujícího vodního paprsku a stručnému popisu zařízení pro generaci pulzujícího vodního paprsku. Dále se zabývá studiem topografie povrchu vytvořeného touto nekonvenční metodou, analýzou získaných dat a jejich následné interpretace.

ANNOTATION OF BACHELOR'S WORK

KLICH, O. The influence of technological parameters on the material surface topography created by pulsating water jet. Ostrava: Department of Machining and Assembly, Faculty of Engineering, VŠB – Technical University of Ostrava, 2009, 37 p. Bachelor's Work, tutor VALÍČEK, J.

The bachelor thesis deals with the principle of pulsating water jet technology and brief description of the equipment for the generation of pulsating water jet. Furthermore, studying the surface topography created by the unconventional method, data analysis and subsequent interpretation.

OBSAH BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Seznam použitého značení	8
Seznam použitých symbolů	9
1 Úvod	11
2 Cíl bakalářské práce	12
3 Vývoj technologie kapalinového paprsku	13
3.1 Druhy kapalinového paprsku.....	13
3.2 Dělení materiálů kapalinovým paprskem.....	14
4 Pulzní vodní paprsek.....	15
4.1 Princip působení pulzního vodního paprsku na povrch materiálu	15
4.2 Zařízení pro pulzní vodní paprsek	17
4.2.1 Vysokotlaká pumpa	17
4.2.2 Ultrazvukový generátor	17
4.2.3 Akustický generátor	17
4.2.4 Trysky	18
4.2.5 Záchytná vana	18
5 Metrologie topografie povrchu	20
5.1 Parametry profilu povrchu	21
5.2 Specifika topografie povrchů vytvořených při řezání technologií PWJ	22
6 Metody měření topografie povrchu	23
6.1 Mechanické metody	23
6.2 Optické metody	24
6.3 Jiné metody	26
7 Experimentální část.....	27
7.1 Příprava vzorků.....	27
7.2 Měření vytvořených vzorků AWJ optickým profilometrem MicroProf FRT	29
7.3 Vlastnosti nově vytvořeného povrchu technologií pulzního vodního paprsku	31
7.4 Analýza dat.....	32
7.5 Další kroky v návaznosti na předmětnou problematiku	34
8 Závěr.....	35
Seznam použitých pramenů	36

Seznam použitého značení

- AWJ - abrazivní vodní paprsek (Abrasive Water Jet)
- MFM - magnetický silový mikroskop (Magnetic Force microscopes)
- RTG - radioizotopový termoelektrický generátor (Radioisotope Thermoelectric Generator)
- SEM - skenovací elektronový mikroskop (Scanning Electron Microscopes)
- PWJ - pulzující vodní paprsek

Seznam použitých symbolů

A	- amplituda tlakových pulzací	[μm]
c	- rychlost šíření rázové vlny	[$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
c_1	- rychlost šíření rázové vlny v kapalině	[$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
c_2	- rychlost šíření rázové vlny v pevné látce	[$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
f	- frekvence ultrazvukového generátoru	[kHz]
L	- vzdálenost trysky od povrchu	[mm]
l_p	- měřená délka	[mm]
l	- délka usměrňovací trubice	[mm]
p	- tlak kapaliny	[MPa]
p_i	- impaktní tlak kapaliny	[MPa]
p_s	- stagnační tlak kapaliny	[MPa]
p_v	- tlak kapaliny před tryskou	[MPa]
R^2	- hodnota spolehlivosti, těsnost shody	[-]
Ra	- střední aritmetická odchylka profilu	[μm]
Rar	- parametr Ra podle regresní rovnice	[μm]
Rq	- střední kvadratická odchylka profilu	[μm]
Rqr	- závislost Rq na L s regresní rovnicí	[μm]
Rz	- největší výška nerovnosti profilu	[μm]
Rzr	- parametr Rz podle regresní rovnice	[μm]
v	- rychlost toku kapaliny při dopadu	[$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]
v_p	- rychlost posuvu řezné hlavy	[$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]
z_p	- výška největšího výstupku v rozsahu měřené délky l_p	[μm]
z_v	- hloubka nejnižší prohlubně v rozsahu měřené délky l_p	[μm]
λ_c	- filtr definující rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitosti	[mm]
λ_f	- filtr definující rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami vln přítomnými na povrchu	[mm]

λ_s	- filtr definující rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln přítomnými na povrchu	$[\mu\text{m}]$
ρ	- hustota obecně	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
ρ_1	- hustota kapaliny	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
ρ_2	- hustota pevné látky	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
\emptyset	- ekvivalentní průměr ploché trysky	$[\text{mm}]$

1 Úvod

Povrch objektu určuje jeho vzhled a tvoří rozhraní mezi základním materiálem a okolím. Při běžném používání výrobků dochází ke vzájemnému styku základního materiálu s okolním prostředím. Volba předúpravy povrchu má zásadní vliv na úspěšnou aplikaci povrchových úprav, na kvalitu povlakových systémů a jejich vlastnosti. Povrchové úpravy materiálů mají značný podíl na kvalitě, vzhledu, životnosti a provozní spolehlivosti výrobku. Moderní doba přináší nové trendy designu, požadavky na funkční vlastnosti povrchu, klade důraz na výslednou kvalitu, na celkovou ekonomickou náročnost a současně na nízkou ekologickou zátěž životního prostředí. Tím vším je ovlivněn současný rozvoj výrobních technologií a zařízení.

Technologie dezintegrace kontinuálním kapalinovým paprskem prodělaly za posledních 40 let prudký rozvoj, a proto jsou dnes široce využívány v komerční sféře. Výzkum kapalinového paprsku se v posledních letech ubírá cestou nižších pracovních tlaků při dosažení srovnatelných výsledků s výsledky získanými vysokotlakými zařízeními. Snížení energetické náročnosti můžeme dosáhnout pomocí pulzního vodního paprsku, který využívá impaktního tlaku p_i . Impaktní tlak je několikanásobně vyšší než tlak statický p_s , což má za následek zvýšení dezintegrace materiálu. Pulzující vodní paprsek tak může být úspěšně využíván zejména k odstraňování povrchových vrstev materiálů, k úpravě povrchu materiálu i v řadě dalších aplikací.

Práce se věnuje studiu topografie povrchu vytvořeného pulzujícím vodním paprskem. Prezentuje způsob hodnocení topografie povrchů vytvořených touto nekonvenční metodou. Na základě analýzy získaných dat a jejich následné interpretace je popsán povrch vytvořený pulzujícím vodním paprskem. Znalost tohoto popisu je velmi důležitá z hlediska nadimenzování optimálních technologických faktorů pulzujícího vodního paprsku ve vztahu k obráběnému materiálu a požadované jakosti finálního povrchu.

2 Cíl bakalářské práce

Cílem bakalářské práce je komparace dosažené drsnosti povrchu materiálů vytvořeného pulzním vodním paprskem při různých technologických parametrech, analýza výsledků a stanovení korelačních vztahů k technologickým parametrům.

K dosažení cíle je potřeba provést:

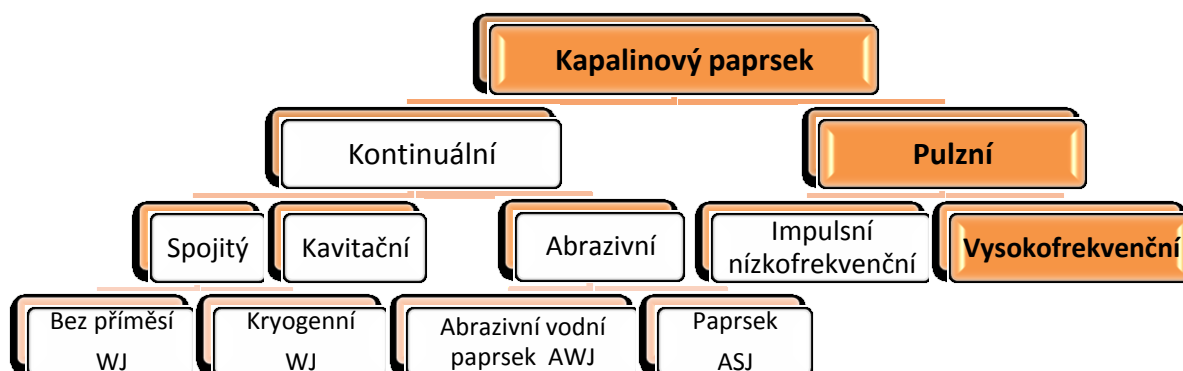
1. Rešerše aktuálního stavu problematiky.
2. Rozbor vývoje technologie kapalinového paprsku.
3. Rozbor technologie pulzujícího vodního paprsku.
4. Metodika měření a hodnocení topografie povrchu vytvořeného pulzujícím vodním paprskem.
5. Analýza experimentálně získaných dat.
6. Vyhodnocení vlivu hlavních technologických parametrů pulzujícího vodního paprsku na topografii povrchu.

3 Vývoj technologie kapalinového paprsku

Technologie dezintegrace vodním paprskem se začala rozvíjet počátkem 20. století, kdy byly aplikovány první vodní paprsky s velmi nízkým tlakem při dobývání rašelinových ložisek ve středním Prusku. Po 1. světové válce byl podobný způsob aplikace vyvinut v Sovětském Svazu a od roku 1915 byl uplatňován při těžbě uhlí [17]. Na přelomu 50. a 60. let zavedl v technické praxi Dr. Norman Franz řezání dřeva vodou (při tlaku asi 200 MPa). Potřeba efektivně dělit stávající i nově vyvíjené technické materiály si vynutila rozvoj kontinuálně pracujících systémů pro řezání vysokorychlostním vodním paprskem [11]. Firma McCartney Manufacturing Company z Baxter Springs v Kansasu jako první komerčně rozvinula koncepci kontinuálně pracujících systémů na řezání vodním paprskem při tlacích 200 až 400 MPa (1968). V roce 1971 byla instalována první komerční jednotka (s průtokem $6,3 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ a tlakem kapaliny 275 MPa) v Alton Box Board Company (při řezání lepenkových trubíc pro nábytkářský průmysl). V roce 1979 byl na trh uveden abrazivní vodní paprsek. Byl původně vyvinut pro NASA za účelem řezání keramických obkladů pro izolaci povrchu raketoplánu. V 80. letech nastal rozvoj abrazivního suspenzního paprsku. V 90. letech pak rozvoj pulzujících vodních paprsků. Druhy jednotlivých kapalinových paprsků jsou ilustračně uvedeny v následující podkapitole [8].

3.1 Druhy kapalinového paprsku

Druhy kapalinového paprsku a jejich dělení (obr. 3.1) je blíže popsáno v literatuře [11], [12]. Technologii kapalinového paprsku lze v zásadě rozdělit podle dvou hlavních kritérií. První kritérium je dáno přetržitostí paprsku v čase na kontinuální paprsek a pulzní paprsek. Dále pak lze paprsek rozdělit podle jeho složení, a to na paprsek čistý nebo abrazivní.



Obrázek 3.1 - Dělení kapalinového paprsku.

3.2 Dělení materiálů kapalinovým paprskem

Řezání je dělicí proces způsobený silovým, napěťovým a deformačním účinkem dělicího nástroje na materiál obrobku, přičemž nástrojem je zde vysokorychlostní proud vody, do kterého lze přidávat abrazivo. Výsledkem dělicího procesu je dělicí řez.

Při dělení materiálu pomocí kapalinového paprsku dochází k odstranění malého množství materiálu z místa řezu, přičemž vznikají řezné mezery. Kapalinový paprsek jako řezný nástroj je flexibilní nástroj, který je schopen obrábět všechny známé materiály [16].

Technologie vodního paprsku je progresivní a perspektivní technologií, která se stále vyvíjí. V současné praxi nacházejí nejširší uplatnění dva základní způsoby dělení kapalinovým paprskem, a to dělení čistým kapalinovým paprskem a abrazivním kapalinovým paprskem. Různé aplikace kapalinového paprsku jsou uvedeny v tab. 3.1.

Tabulka 3.1 - Aplikace vodního paprsku.

Obrábění materiálů	Čištění materiálů	Zušlechťování povrchu
řezání	čištění	hlazení
vrtání	odstraňování koroze	leštění
frézování	odstraňování okují	zdrsňování
drážkování	sanování	zpevňování

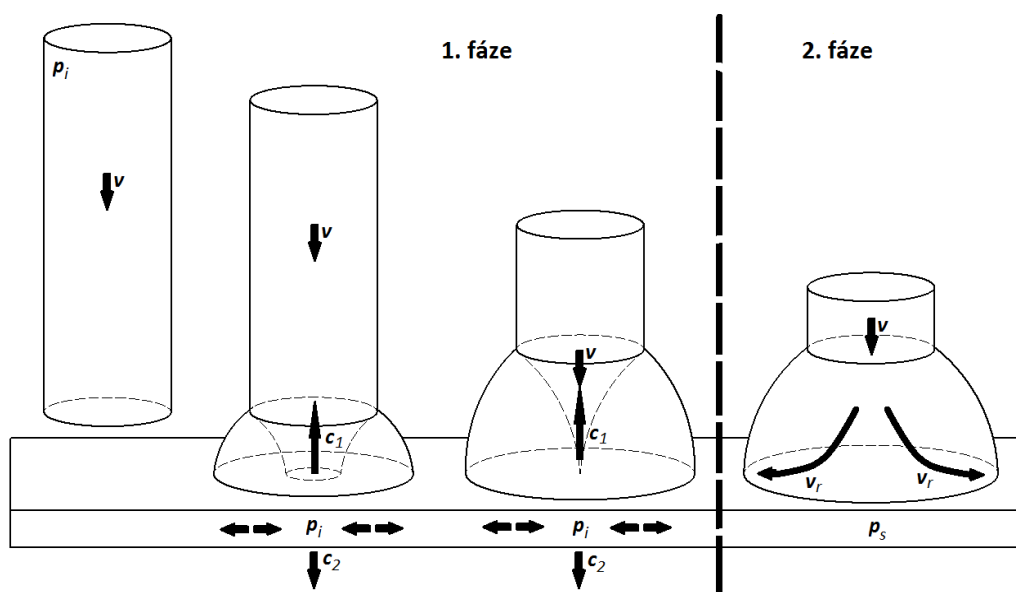
Výzkumy se zaměřují na lepší účinnost řezání a zároveň snižování provozních nákladů. V současné době se provádí výzkum pulzního vodního paprsku. Tato metoda byla vyvinuta a testována v laboratorních podmínkách Oddělení dezintegrace materiálů na Ústavu geoniky AV ČR, v. v. i. v Ostravě. Práce se soustřeďuje na pulzní vodní paprsek, který se vyznačuje vyšší erozivní účinností než kontinuální vodní paprsek. Hlavním nosným médiem je voda.

4 Pulzní vodní paprsek

Technologie pulzního vodního paprsku je ekologicky šetrná svou výrobou, nevznikají při ní žádné škodlivé zplodiny. Obráběcím flexibilním nástrojem je voda.

4.1 Princip působení pulzního vodního paprsku na povrch materiálu

Při střetu vysokorychlostní kapaliny s tuhým tělesem vzniká krátkodobý přechodový jev, který je provázen výrazným nárůstem tlaku v místě dopadu kapaliny na povrch. Dopad kapaliny na pevný povrch totiž probíhá ve dvou fázích, které jsou zobrazeny na obr. 4.1.



Obrázek 4.1 - Dvě fáze dopadu kapaliny na pevný povrch.

V první fázi se kapalina chová jako stlačitelná a generuje díky tzv. hydraulickému rázu (water hammer) impaktní tlak p_i (4.1),

$$p_i = \frac{v\rho_1c_1\rho_2c_2}{\rho_1c_1 + \rho_2c_2} \quad [\text{Pa}] \quad (4.1)$$

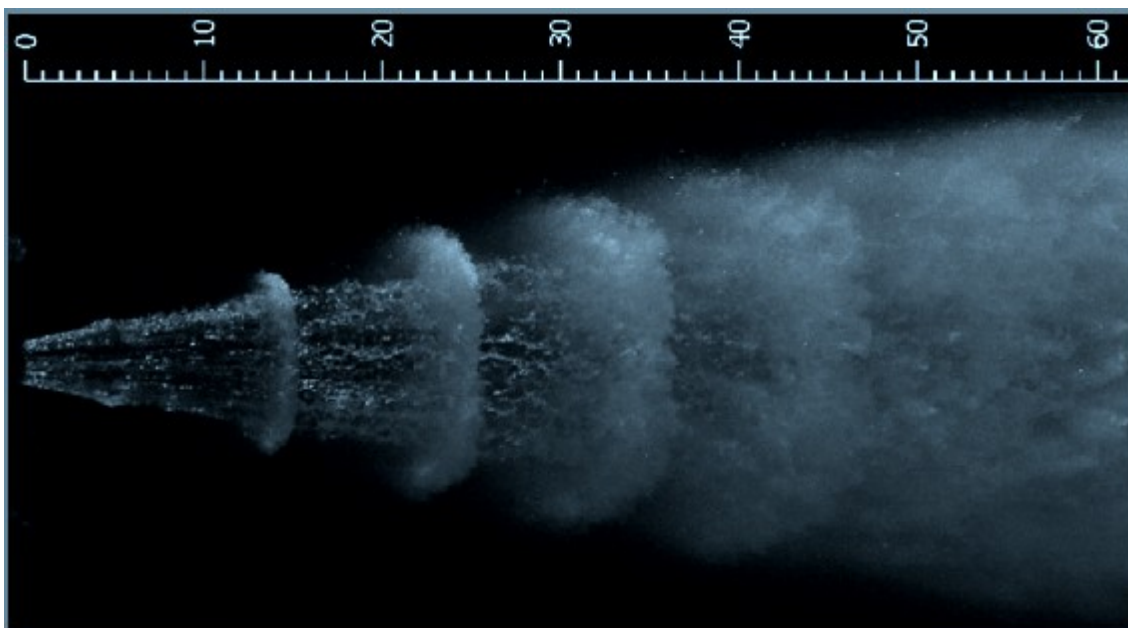
kde v je rychlost dopadu kapaliny, ρ_1 a ρ_2 jsou hustoty a c_1 a c_2 rychlosti šíření rázové vlny v kapalině a pevné látce. Impaktní tlak p_i je zodpovědný za velkou část poškození způsobeného nárazem kapaliny na pevný povrch [5].

Po odeznění impaktního tlaku začíná druhá fáze dopadu kapaliny. V okamžiku, kdy je překročena mez tlakové deformace kapaliny, kapalina začíná proudit radiálně

kolmo k ose paprsku směrem ven podél dopadové plochy. Začne se chovat jako nestlačitelná a tlak v centrální ose paprsku poklesne na mnohem nižší stagnační tlak p_s (4.2). Ten je dán kinetickou energií objemové jednotky

$$p_s = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad [\text{Pa}] \quad (4.2)$$

Generováním dostatečně velkých tlakových pulzací tlakové kapaliny před výstupem z trysky (tzv. modulací) je možno vytvářet vodní pulzní paprsek, který z trysky vystupuje jako kontinuální kapalinový paprsek a do pulzů se formuje až v určité vzdálenosti od výstupu z trysky (obr. 4.2). Výhodou pulzního kapalinového paprsku oproti kontinuálnímu paprsku je skutečnost, že při dopadu jednotlivých pulzů se na dopadové ploše cyklicky generuje impaktní tlak, který je několikanásobně vyšší než stagnační tlak generovaný dopadem kontinuálního paprsku za jinak stejných podmínek. Vlivem účinků pulzního paprsku navíc dochází k únavovému a smykovému namáhání v materiálu cyklickým zatěžováním dopadové plochy, případně působením radiálního vysokorychlostního toku kapaliny po povrchu. To pak dále zvyšuje účinnost pulzního kapalinového paprsku v porovnání s kontinuálním paprskem [5].



Obrázek 4.2 - Pulzní vodní paprsek generovaný tlakem 20MPa (stupnice reprezentuje vzdálenost povrchu od trysky v mm) [6].

4.2 Zařízení pro pulzní vodní paprsek

Hlavní prvky zařízení pro pulzní vodní paprsek je tvořeno vysokotlakou pumpou, potrubím na rozvod vody, ultrazvukovým generátorem, akustickým generátorem, vodní tryskou.

4.2.1 Vysokotlaká pumpa

Vysokotlaké pumpy (obr. 4.3) slouží ke generování vysokého tlaku v kapalině. Pro pulzní paprsek se využívají tlaky od 10 MPa do 150 MPa.



Obrázek 4.3 - Vysokotlaké plunžrové čerpadlo [18].

4.2.2 Ultrazvukový generátor

Ultrazvukové generátory se vyrábějí s různými hodnotami výstupních frekvencí a výkonem (obr. 4.4). Ultrazvuk je akustické vlnění o kmitočtu vyšším než 20 kHz.



Obrázek 4.4 - Ultrazvukový generátor [19].

4.2.3 Akustický generátor

Akustický generátor je založen na generování akustických vln působením akustického převodníku na stlačenou kapalinu a jejich přenos přes tlakový systém k trysce.

4.2.4 Trysky

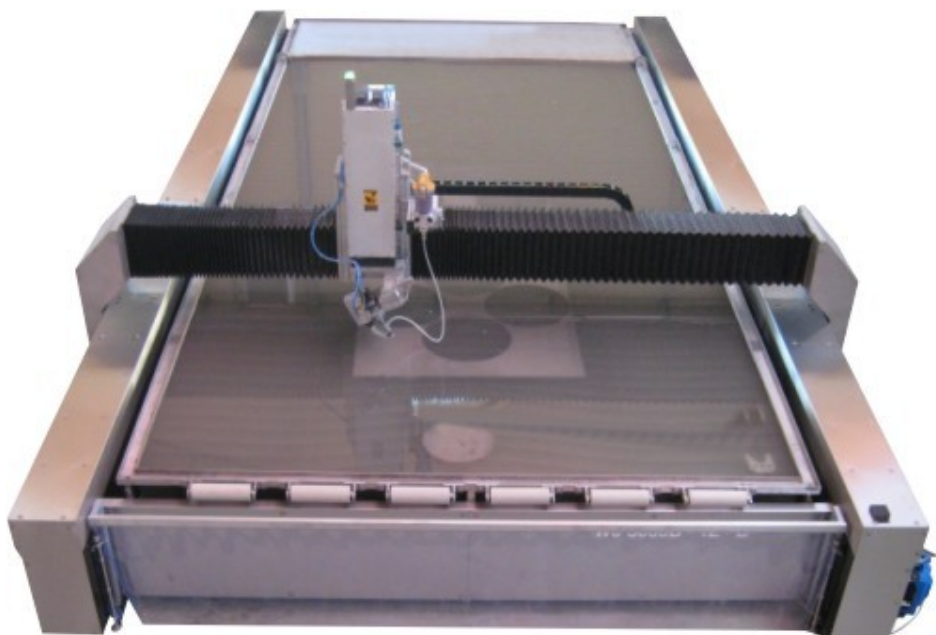
V technické praxi se používají trysky různých tvarů a velikostí, nejčastěji trysky rotační, ploché a kruhové (obr. 4.5). Trysky se liší především tvarem produkovaného paprsku a průtočným množstvím kapaliny.



Obrázek 4.5 - Trysky [20].

4.2.5 Záchytná vana

Záchytná vana se používá z důvodu zachytávání použité kapaliny a oddělených částí obráběného materiálu (obr. 4.6). Paprsek se zde rozptýlí a ztratí svoji kinetickou energii. Zároveň slouží jako stůl pro upínání obrobků.



Obrázek 4.6 - Vana na zachytávání kapaliny [21].

4.3 Charakteristika technologických parametrů pulzního paprsku

Charakteristiky obrobené plochy a úběr materiálu ovlivňuje množství technologických faktorů. Hlavní technologické parametry pulzního vodního paprsku jsou:

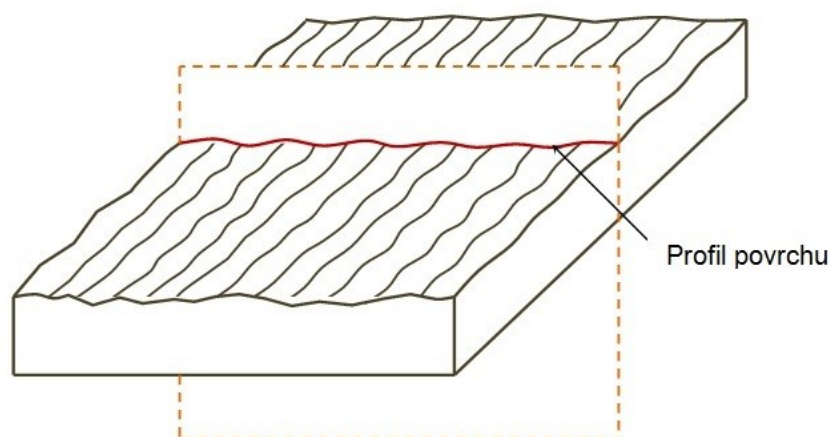
- průtočné množství kapaliny,
- tlak kapaliny,
- posuvná rychlost trysky nad povrchem obráběného materiálu,
- parametry trysek,
- frekvence ultrazvukového generátoru,
- amplituda akustického generátoru,
- vzdálenost trysky od povrchu obráběného materiálu,
- fyzikálně-mechanické vlastnosti materiálu obrobku.

Z uvedených parametrů nejsilněji ovlivňujících topografii povrchu byla v experimentální části práce zvolena vzdálenost trysky od povrchu obráběného materiálu, protože na ní závisí účinnost působení paprsku jakožto flexibilního nástroje. Dochází přitom ke změně tvaru paprsku při výstupu z trysky až po dopad na obráběný materiál. Po výstupu z trysky se paprsek chová jako kontinuální. Následně se začíná formovat především z důvodu změny rychlosti toku kapaliny do jednotlivých shluků, přičemž rychlejší část toku kapaliny dohání pomalejší. Nakonec nastává třetí fáze, kdy se paprsek rozpadá na velké množství jednotlivých kapiček, které již nemají dostatečnou energii pro erozi povrchu materiálu. K detailnějšímu popisu vlivu ostatních technologických parametrů na topografii povrchu materiálu vytvořených pulzním vodním paprskem by byla zapotřebí experimentální databáze, která není cílem a ani obsahem práce.

5 Metrologie topografie povrchu

Všechny technologické metody využívané při obrábění zanechávají na povrchu nerovnosti, které mají zásadní význam pro topografii povrchu materiálu. Vytváření nového profilu povrchu je závislé na mnoha faktorech, jako jsou vlastnosti použitého materiálu, pracovní podmínky, použité nástroje, obráběcí stroje a další technologické parametry. Topografie povrchu je členěna na složky podle rozteče příslušných nerovností. Jedná se o složku s nejmenší roztečí, která nám tvoří drsnost povrchu, dále složku nazvanou vlnitost povrchu a složku, která má největší rozteč nerovností neboli základní profil.

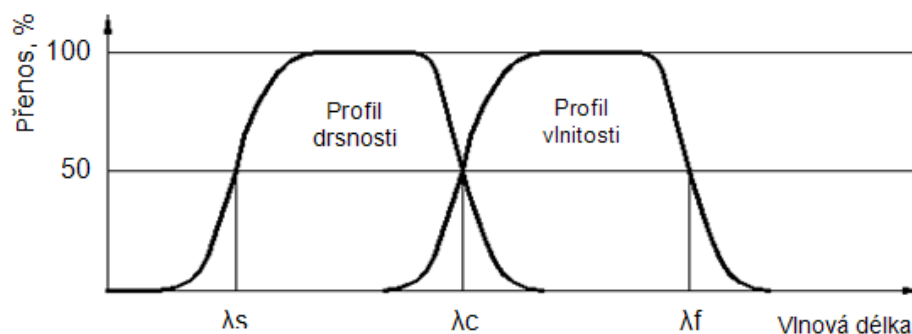
Nerovnosti na povrchu představují prostorový útvar, který lze řešit redukcí do roviny řezu rovinou kolmou k povrchu (obr. 5.1). V rovině řezu je získán profil, který je základním zdrojem informací pro posuzování struktury povrchu [14]. Tento profil se skládá z profilu vlnitosti, profilu drsnosti a kratších a delších složek vln přítomných na povrchu. Jednotlivé složky je možné od sebe separovat filtrací, a to použitím různých druhů filtrů o rozličných vlnových délkách tak, jak je znázorněno jejich přenosovou charakteristikou na obr. 5.2 [3].



Obrázek 5.1 - Profil nerovnosti povrchu [14].

Filtry lze klasifikovat [3], [4] jako:

- **λ_s filtry** – filtry definující rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln přítomnými na povrchu;
- **λ_c filtry** – filtry definující rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitosti;
- **λ_r filtry** – filtry definující rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami vln přítomnými na povrchu.



Obrázek 5.2 - Přenosová charakteristika profilu drsnosti a vlnitosti [4].

5.1 Parametry profilu povrchu

Charakter drsnosti povrchu je možné vyjádřit prostřednictvím parametrů drsnosti, které jsou blíže specifikovány v normě ČSN EN ISO 4287. Požadavky na drsnost povrchu vyjadřujeme veličinou drsnost, číselnou hodnotou příslušné veličiny a základní délkou, na které se veličina určuje.

Normované charakteristiky drsnosti povrchu jsou:

R_a – střední aritmetická úchylka profilu,

R_q – střední kvadratická úchylka profilu,

R_z – největší výška nerovností profilu.

Střední aritmetická úchylka profilu R_a je definována jako přednostní výšková charakteristika drsnosti povrchu. Jde o střední aritmetickou hodnotu absolutních úchylek profilu od vztažené roviny v rozsahu základní délky

$$R_a = \frac{l}{l_p} \int_0^{l_p} |y(x)| dx \quad \text{nebo} \quad R_a \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y(x_i)|, \quad (1)$$

kde je: l_p měřená délka [m];

$y(x)$ funkce popisující profil [-];

$y(x_i)$ souřadnice n bodů profilu povrchu v mezích měřené délky, přičemž $i = 1, 2, 3, \dots, n \dots$ [-]

Střední kvadratická úchylka profilu R_q je definována jako kvadratická analogie parametru R_a a reflektuje jeho časově-prostorový průběh a současně má přímý vztah k jeho energetickému obsahu a je tedy i měřítkem nebezpečnosti a škodlivosti nerovností povrchu. Je definována zápisem

$$Rq = \sqrt{\frac{l}{l_p} \int_0^{l_p} y^2(x) dx} \quad \text{nebo} \quad Rq = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2(x_i)} \quad (2)$$

Největší výška nerovnosti profilu Rz je definována jako výšková charakteristika drsnosti povrchu určená vzdáleností mezi čarou výstupků profilu a čarou prohlubní profilu v rozsahu základní délky [7]

$$Rz = Zp + Zv \quad (3)$$

kde je: Zp výška největšího výstupku v rozsahu měřené délky l_p [μm];

Zv hloubka nejnižší prohlubně v rozsahu měřené délky l_p [μm].

5.2 Specifika topografie povrchů vytvořených při řezání technologií PWJ

Nerovnost povrchů vytvářených obráběním, ať klasickými či nově rozvíjenými technologiemi (např. při obrábění ultrazvukem, laserem, plazmou nebo vodním abrazivním paprskem, pulzním vodním paprskem) je vlastnost, která je pro účely technické praxe přesně normována. Z výrobně technického hlediska jde o technologickou vlastnost obrobků, která ve značné míře ovlivňuje životnost a spolehlivost součástek, energetické ztráty, odolnost proti opotřebení a ekonomiku strojů a zařízení.

V normě je definována škála základních metrologických operací sloužících ke stanovení požadované třídy kvality. Tyto operace vedou ke správným výsledkům u povrchů vytvářených klasickými technologiemi. Fyzikální podstata vytváření nových povrchů neklasickými technologiemi je odlišná, proto i jimi obrobené povrchy budou mít odlišnou geometrickou charakteristiku. Při snaze o zachování kompatibility se stávajícími strojírenskými normami a dobře propracovanou strojírenskou metrologií i v případě obrábění PWJ se jako základní ukazatel kvality povrchu obrobků opracovaných PWJ volí souhlasně se stávajícími normami parametr Ra [11].

6 Metody měření topografie povrchu

Na počátku 20. století byly vyvinuty první přístroje pro kontrolu, posuzování a hodnocení splnění předepsaných požadavků na topografii obrobeného povrchu. Výrazný pokrok se projevil při uplatnění digitálních metod v 60. letech, které umožňovaly hodnocení povrchu metodou 3D.

Metody a přístroje pro měření topografie povrchu, které poměrně vyčerpávajícím způsobem uvádí literatura [2], lze zjednodušeně rozdělit na 3 základní skupiny:

- mechanické metody,
- optické metody,
- jiné metody.

6.1 Mechanické metody

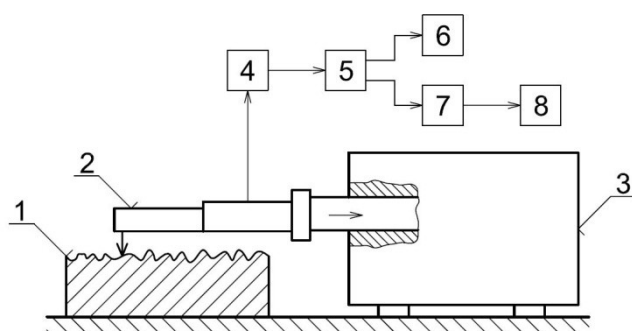
Mechanické (dotykové) metody řadíme mezi nejčastější metody, které se používají ve strojírenské praxi. Jejich hlavní výhodou je přímé měření, schopnost zobrazit měřený geometrický profil. Měření můžeme použít pro všechny typy povrchů, naměřené hodnoty lze pak využít jako vztažné nebo srovnávací hodnoty pro jiné metody měření. Nicméně při měření dochází k elastické a plastické deformaci v povrchové vrstvě v důsledku tlaku na hrot snímače. Hrot snímače nám nevratně poškodí měřený povrch, což je nevhodné pro hodnocení povrchu a výsledek měření. V tab. 6.1 jsou uvedeny výhody a nevýhody mechanických metod

Tabulka 6.1 - Výhody a nevýhody mechanických metod [9].

Výhody	Nevýhody
Měření parametrů topografie povrchu je přímé.	Destrukce povrchu u měkčích materiálů.
Lze použít pro kalibraci výsledků z nepřímých metod.	Relativně malý pohyb hrotu po měřeném povrchu.
Velký rozsah rozlišení ve směru kolmém na plochu.	Neumožňuje kontinuální kontrolu a řízení kvality povrchu.
Vysoká rozlišovací schopnost.	Měření nemůže být dálkové.

Kontaktní profilometr HOMMEL TESTER T8000

Kontaktní profilometr (obr. 6.1) se skládá z mechanické a elektronické části. Mechanickou část tvoří stůl, na který se ukládá měřená součást a stojan. Po stolku se svisle posouvá zařízení s ramenem opatřeným snímačem. Snímač má tvar hrotu. Elektronická část transformuje mechanický signál generovaný snímacím hrotem na signál elektrický, který se po zpracování interpretuje jako číselná hodnota zvoleného parametru struktury povrchu, popř. jako grafický záznam [13].



- 1 – Měřená součást,
- 2 – snímací hlavice s měřicím hrotem,
- 3 – posuvný mechanismus,
- 4 – zesilovač,
- 5 – filtr,
- 6 – registrační jednotka,
- 7 – jednotka zpracovávající měřicí signál,
- 8 – zobrazovací jednotka.

Obrázek 6.1 - Schematické znázornění principu kontaktního profilometru [13].

6.2 Optické metody

Optické metody jsou vhodnou alternativou měření topografie povrchu k měření dotykovými profilometry. Efektivita a operativnost optických profilometrů je zpravidla vyšší než u mechanických, jelikož umožňují nedestruktivně a bezkontaktně měřit povrchy mikrostruktury obzvláště vhodně při potřebě měření online. Hodnocení struktury povrchu optickými metodami je založeno na interakci světla s nerovnostmi povrchu. Optické metody jsou schopny světelným paprskem nepřímou kopírovat zdrsňený povrch a dávat nám velký počet technicky užitečných informací o jeho charakteru. Měřicí postupy jsou často jednodušší a rychlejší než u kontaktních profilometrů. Používají se k měření menších ploch, podle zvětšení lze měřit plochy v řádu několika mm až po mikronovou oblast. Výhodou je získání plošné 3D informace v krátkém časovém intervalu, přičemž nehrozí poškození povrchu.

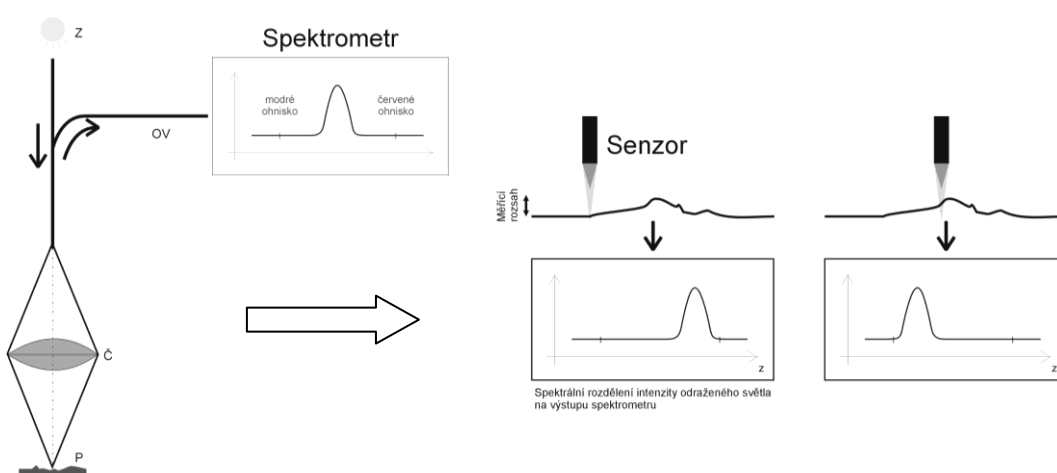
Výhody a nevýhody této metody jsou uvedeny v tab. 6.2.

Tabulka 6.2 - Výhody a nevýhody optických metod [9].

Výhody	Nevýhody
Schopnost kontinuální kontroly a řízení kvality povrchu.	Měření parametrů topografie je nepřímé.
Opakovatelnost měření.	Složitější interpretace výsledků.
Bezkontaktnost a nedestruktivnost.	Ztížená korelovatelnost na normované parametry.
Možnost měření z větší vzdálenosti.	
Okamžité výsledky.	

Optický profilometr MicroProf FRT

Princip činnosti optického profilometru MicroProf FRT je založen na základních fyzikálních zákonech optického zobrazování (obr. 6.2). Bílé světlo ze zdroje Z je optickým vláknem OV přivedeno ke spojně čočce Č, která v důsledku své chromatické aberace fokusuje jednotlivé monochromatické složky bílého světla do různé výšky nad vztažnou rovinou. Po dopadu na studovaný povrch vzorku je fokusované světlo optimálně odraženo zpět do zmíněné čočky a optickým vláknem přivedeno do miniaturního spektrometru. Hodnota vlnové délky maxima intenzity světla vystupujícího ze spektrometru je pomocí kalibrační tabulky převedena na hodnotu vzdálenosti mezi senzorem a povrchem vzorku. V této vzdálenosti jsou zahrnuty nejen výškové nerovnosti povrchu, ale i tzv. pracovní vzdálenost senzoru od vztažné roviny. Pracovní vzdálenost je rovna 5 mm, tj. měření je vždy nekontaktní a tedy i nedestruktivní [15].



Obrázek 6.2 - Princip činnosti optického profilometru MicroProf FRT [15].

6.3 Jiné metody

Mechanické a optické metody hodnocení topografie povrchu nám vždy nezajistí komplexní charakteristiku měřeného povrchu. Proto jsou již desítky let vyvíjeny jiné doplňující metody, u kterých se jejich tvůrci snaží vyloučit nevýhody mechanických a optických měření. Prioritním zájmem je vždy zajistit bezkontaktnost měření, vyšší hodnotu výstupního signálu, potlačit šumy různého původu, zvolit vhodnou kombinaci s klasickými profilometry a získat paralelní výsledky, aby bylo možno zajistit ucelený obraz o studovaném povrchu z jediného měření [1]. Některé z nejznámějších metod jsou uvedeny v tab. 6.3.

Tabulka 6.3 - Nemechanické a neoptické metody [10].

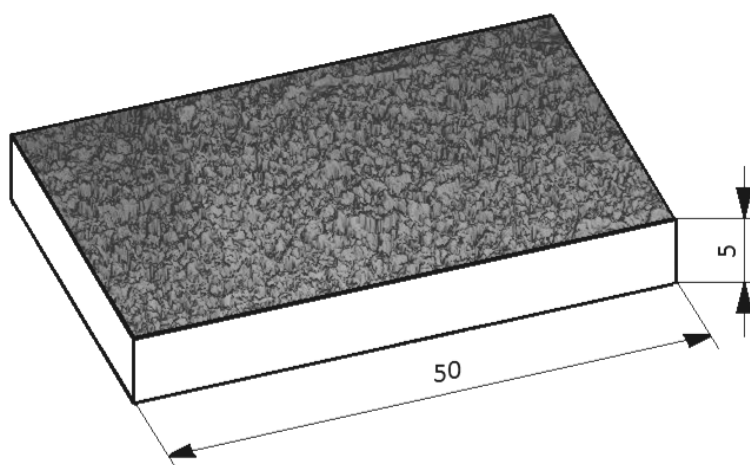
Metoda	Popis
RTG	Využívá atomárních vlastností materiálu povrchu po jejich iniciaci rentgenovými paprsky, jejichž vlnová délka je přibližně stejná jako vzdálenost atomu v krystalické mřížce.
SEM	Je založena na analýze proudu elektronů odražených povrchem a kalibraci na parametry struktury povrchu (elektrony jsou urychlovány vysokonapětovým elektrostatickým polem mezi dvěma nebo třemi magnetickými čočkami).
MFM	Umožňuje na základě zmagnetování studovaného vzorku snímat jeho magnetické projevy a jejich analýzou, kalibrací a korelací určit funkční vztahy popisující strukturu povrchu.

7 Experimentální část

V experimentální části je uvedena příprava vzorků od nastavení vstupních technologických parametrů pulzního vodního paprsku přes dostatečný soubor ověřovacích měření pomocí mikroskopu MicroProf FRT. Dále je zde provedena analýza naměřených dat s využitím programu Mark III a komparace naměřené drsnosti povrchu ve vztahu ke vzdálenosti trysky od povrchu vzorku.

7.1 Příprava vzorků

Vzorky (obr. 7.1) byly zhotoveny technologií pulzujícího vodního paprsku na Ústavu geoniky AV ČR v Ostravě. Testovací vzorky byly připraveny z 50 mm širokého a 5 mm tlustého hliníkového pásu válcovaného za studena vyrobeného z Al99,5 (99,5 % hliníku).

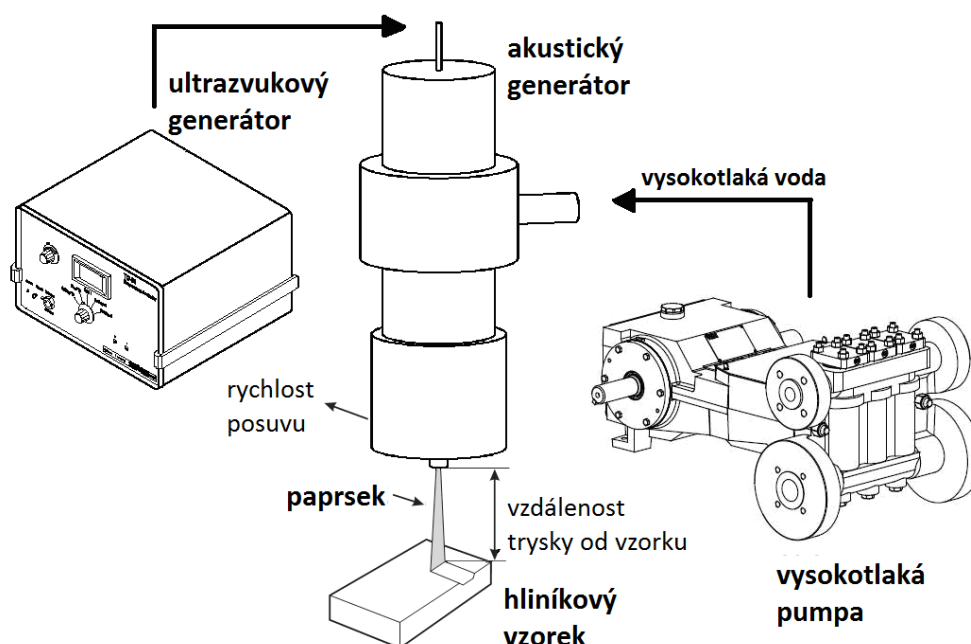


Obrázek 7.1 - Schematické znázornění zkušební vzorku.

Tyto vzorky byly zhotoveny za konstantních podmínek (tab. 7.1) na zařízení PTV-37-60 Pump. Jediným proměnným parametrem byla vzdálenost trysky od povrchu obráběného materiálu, a to $L = 30, 35, 40, 50, 60, 70, 80, 90$ [mm].

Podle schématu experimentálního uspořádání pro dezintegraci materiálu pomocí pulzního vodního paprsku (obr. 7.2) byl vysoký tlak vody generován pomocí plunžrového čerpadla (s pracovním tlakem 30 MPa). Vysokotlaká voda byla přiváděna do akustického generátoru tlakových pulzací vybaveného plošnou tryskou (s průměrem trysky 2,05 mm a dopadovým úhlem 15°). Pro buzení pulzací byl použit ultrazvukový generátor s amplitudou vibrací 3 μm . Tento způsob generování pulzního kapalinového paprsku byl vyvinut na Ústavu geoniky AV ČR, v. v. i. v Ostravě a je založen na generování

akustických vln působením akustického převodníku na stlačenou kapalinu a jejich přenos přes tlakový systém k trysce. Akustický generátor generoval plochý pulzní paprsek (obr. 7.2), který se pohyboval posuvnou rychlostí $0,1 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ nad vzorkem.



Obrázek 7.2 - Schéma experimentálního uspořádání pro dezintegraci materiálu pomocí pulzního vodního paprsku.

Tabulka 7.1 - Technologické parametry při řezání vzorků.

Materiál – Al 99,5	
Tlak plunžrového čerpadla p [MPa]	30
Ultrazvukový generátor f [kHz]	20
Akustický generátor tlakových pulzací A [μm]	7
Ekvivalentní průměr ploché trysky \varnothing [mm]	2,05
Rychlost posuvu řezné hlavy v_p [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]	100
Vzdálenost trysky od povrchu vzorku L [mm]	30 - 90

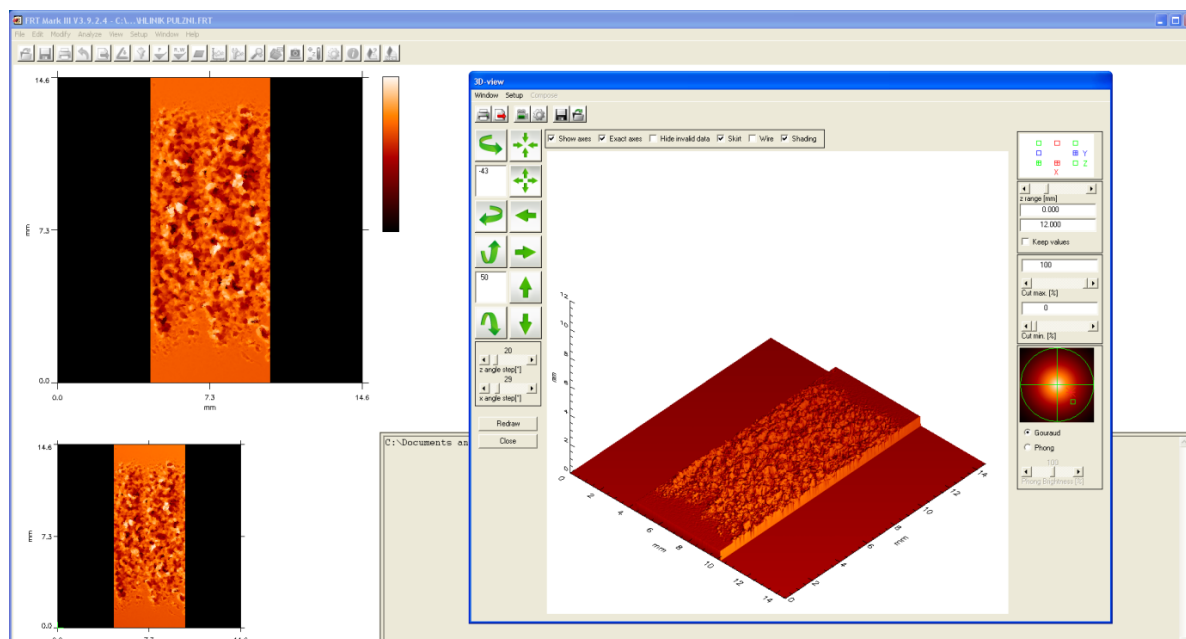
7.2 Měření vytvořených vzorků AWJ optickým profilometrem MicroProf FRT

Povrchy vytvořené pulzním vodním paprskem byly měřeny optickým profilometrem MicroProf FRT (obr. 7.3), který užívají na oddělení Desintegrace materiálů Ústavu geoniky AV ČR, v. v. i., Ostrava. Princip činnosti optického profilometru MicroProf FRT je blíže popsán v předchozí kapitole 6.



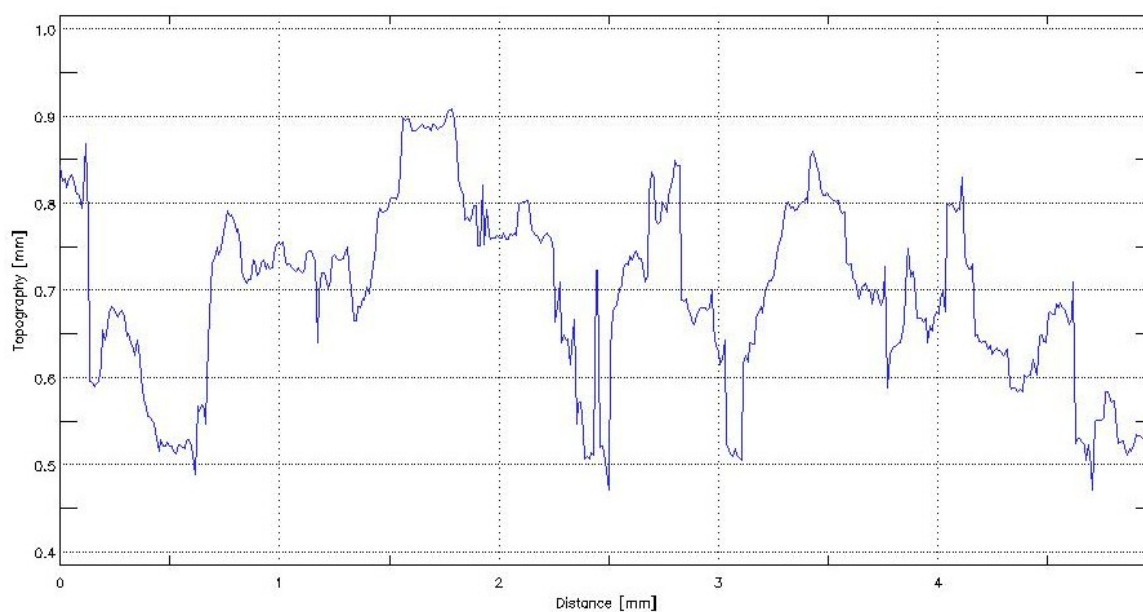
Obrázek 7.3 - Optický profilometr MicroProf FRT.

Vzorek byl umístěn na pohyblivém skenovacím stolku pod nepohybujícím se senzorem. Při měření se skenovací stůl pohyboval v definovaných liniích (v jedné nebo v mnoha vzájemně rovnoběžných liniích s ekvidistanční vzdáleností). Při měření byly získány údaje o textuře studovaného povrchu vytvořeného pulzním paprskem. Zpracování získaných dat bylo provedeno pomocí firmwaru „Mark III“, který umožnil rozsáhlou analýzu těchto dat. Pracovní prostředí programu Mark III je zobrazeno na obr. 7.4.



Obrázek 7.4 - Firmware Mark III.

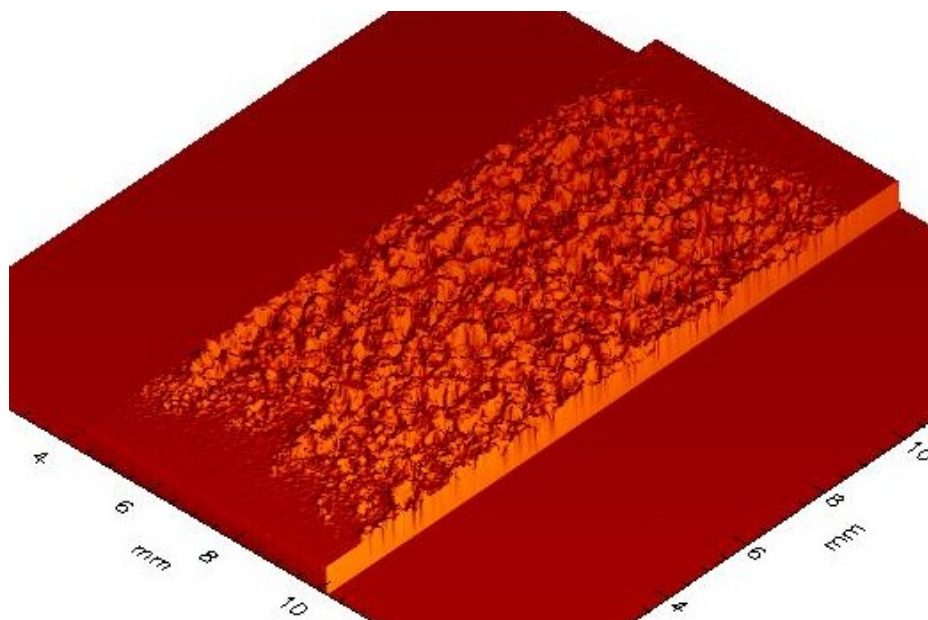
Ze získané topografie byla podrobena analýze čtvercová plocha 5x5 mm. Na této ploše bylo provedeno 10 horizontálních a 10 vertikálních měřících linií. Z každé měřicí linie byly získány signály (obr. 7.5), ze kterých byly stanoveny 2D parametry povrchu (střední aritmetická odchylka profilu povrchu R_a , střední kvadratická odchylka profilu povrchu R_q a největší výška nerovnosti profilu R_z).



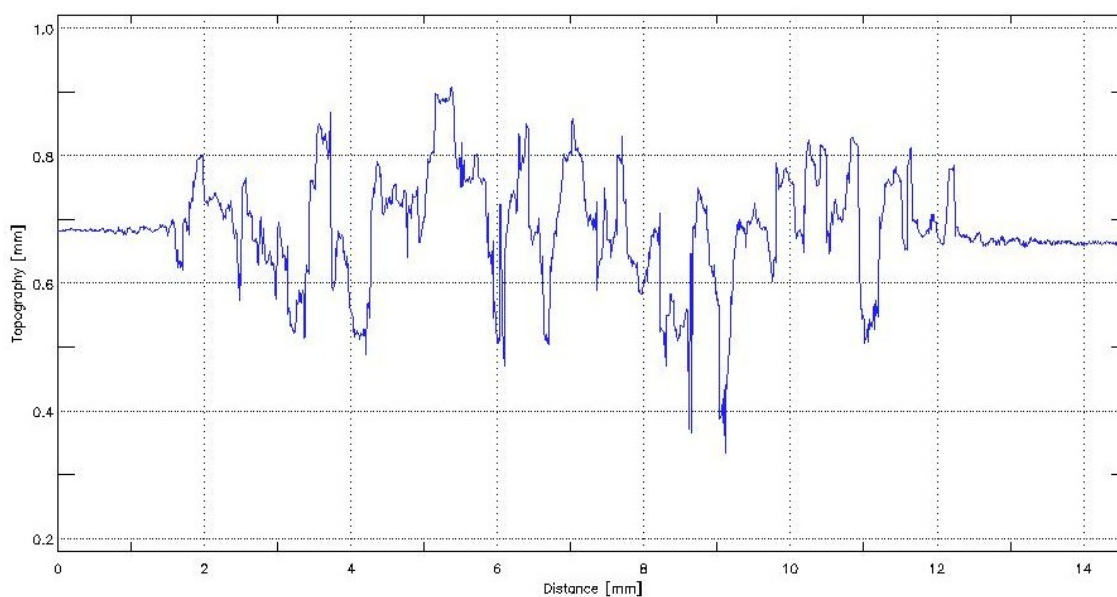
Obrázek 7.5 - Profil povrchu zkoumaného vzorku.

7.3 Vlastnosti nově vytvořeného povrchu technologií pulzního vodního paprsku

Podle obr. 7.6 a 7.7 mezi vlastnosti nově vytvořeného povrchu patří náhodná struktura vnější vrstvy materiálu. Povrch má ve vertikálním i horizontálním směru stejné parametry, tudíž se předpokládá, že nově vzniklá vrstva materiálu pulzním vodním paprskem má kvazi strukturu povrchu.



Obrázek 7.6 - 3D topografie povrchu zkoumaného vzorku.



Obrázek 7.7 - 2D profil povrchu zkoumaného vzorku.

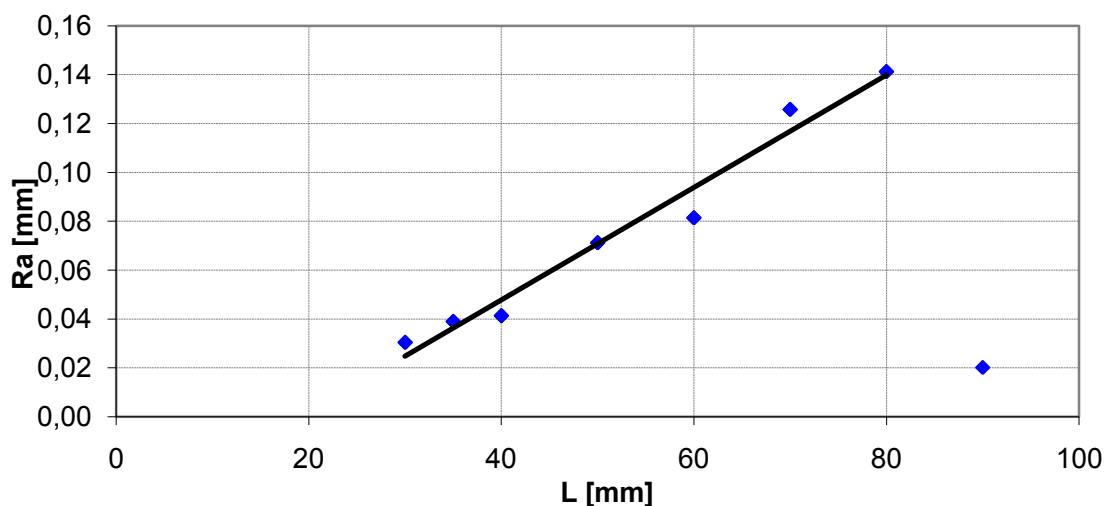
Byly zkoumány vlastnosti nově vytvořeného povrchu hliníkového vzorku pomocí technologie pulzního vodního paprsku (obr. 7.6, obr. 7.7). Hliníkové vzorky byly vystaveny pulzním proudům generovaným pod různými pracovními podmínkami (např. provozní tlak, vzdálenost a buzení amplitudy akustického generátoru). Efekty dopadu pulzního vodního paprsku na hliníkový povrch byly studovány použitými metodami optické mikroskopie a analýzy obrazu. Topografie povrchu vytvořeného působením pulzního proudu a charakteristiky povrchu byly měřeny optickým povrchovým měřicím systémem. V tab. 7.2 jsou uvedeny hodnoty parametrů R_a , R_q , R_z ve vztahu ke vzdálenosti L .

Tabulka 7.2 - Naměřené parametry povrchu vytvořeného PWJ.

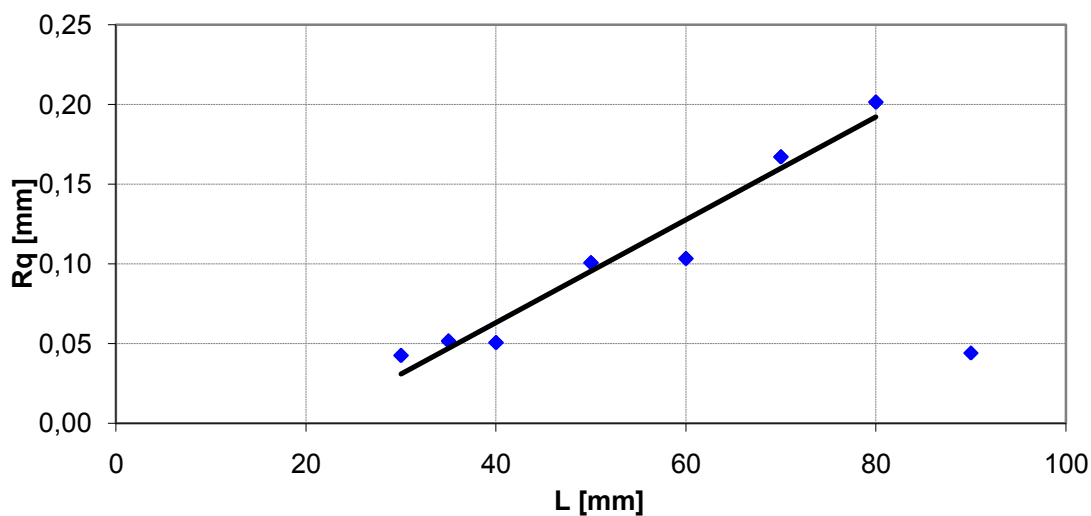
No.	L [mm]	R_a [μm]	R_q [μm]	R_z [μm]
1	30	30	42	203
2	35	39	51	223
3	40	41	51	180
4	50	71	101	418
5	60	81	103	372
6	70	126	167	608
7	80	141	201	720
8	90	20	44	190

7.4 Analýza dat

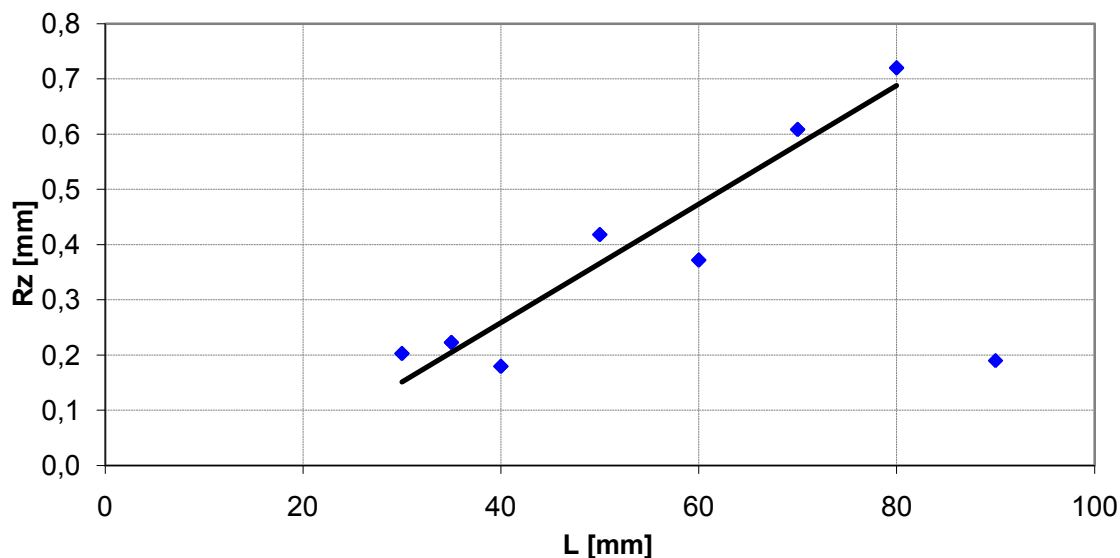
Na obr. 7.8, 7.9 a 7.10 jsou vykresleny grafy pro R_a , R_q , R_z ve vztahu ke vzdálenosti L z tab. 7.2. Do určité vzdálenosti L je vliv na texturu povrchu rostoucí, a to až do vzdálenosti 80 mm (formující se pulzní paprsek). Pak prudce klesá, což je způsobeno tím, že při vzdálenosti 90 mm se pulzní paprsek rozpadá a vytváří kapky bez dostatku energie erodovat povrch hliníkového materiálu. Je patrné, že při podmínkách experimentu (materiál hliník Al99,5; vzdálenost $L = 30, 35, 40, 50, 60, 70, 80, 90$ [mm]; rychlost posuvu $v_p = 100$ [mm·min⁻¹], tlak před tryskou $p_v = 30$ [MPa]) lze závislost drsnosti povrchu na vzdálenosti trysky od povrchu materiálu v rozsahu $L = 30\text{--}80$ [mm] popsat rovnicemi lineární regrese a hodnotou spolehlivosti R^2 . Tyto rovnice nám mohou sloužit k navržení optimální vzdálenosti trysky od povrchu materiálu, tj. k dosažení požadované drsnosti obrobeného povrchu.



Obrázek 7.8 - Závislost střední aritmetické úchyly R_a na vzdálenosti trysky L s regresní rovnicí $R_{ar} = 2,305L - 44,399$ [μm], přičemž hodnota spolehlivosti $R^2=0,972$.



Obrázek 7.9 - Závislost střední kvadratické úchyly R_q na vzdálenosti trysky L s regresní rovnicí $R_{qr} = 3,227L - 65,870$ [μm], přičemž hodnota spolehlivosti $R^2=0,953$.



Obrázek 7.10 - Závislost maximální výšky nerovností R_z na vzdálenosti trysky L s regresní rovnicí $R_{zr} = 10,728L - 170,294$ [μm], přičemž hodnota spolehlivosti $R^2=0,909$.

7.5 Další kroky v návaznosti na předmětnou problematiku

V budoucnu bych chtěl pokračovat v problematice této oblasti tím, že budu usilovat o:

- vytvoření širšího souboru vzorků z různých materiálů,
- provedení dostatečného počtu dalších ověřovacích měření na nově vyhotovených vzorcích,
- matematicko-statistické zpracování dat za účelem získání informací o geometrických parametrech topografie povrchu ve vztahu k vytipovaným technologickým parametrům,
- použití zpracovaných informací pro optimalizaci technologie pulzního vodního paprsku.

8 Závěr

Úvodní kapitoly práce jsou věnovány vývoji technologie kapalinového paprsku. Je zde uvedeno schematické rozdělení jednotlivých druhů kapalinového paprsku se zaměřením na pulzní vodní paprsek. Je podrobněji popsán princip pulzního vodního paprsku na povrch materiálu a zařízení, které je využíváno pro tuto technologii. Metoda generování pulzního vodního paprsku byla vyvinuta a testována v laboratorních podmínkách na Ústavu geoniky AV ČR, v. v. i. V Ostravě. V současné době zde probíhá výzkum pro další aplikace povrchových úprav různých materiálů.

V další části práce jsou uvedeny vytipované parametry topografie povrchu, které nám slouží k hodnocení jakosti nově vytvořeného povrchu materiálů a zároveň k zachování kompatibility se stávajícími strojírenskými normami. Jsou porovnány různé metody měření topografie povrchu s uvedením jednotlivých výhod a nevýhod. Z prezentovaných metod je podrobněji popsána optická metoda (optický profilometr MicroProf FRT), která byla použita pro měření povrchů vytvořených pulzním vodním paprskem.

V předmětné práci jsou prezentovány výsledky získané z topografie povrchu vytvořené pulzním vodním paprskem na vzorcích z 50 mm širokého a 5 mm tlustého hliníkového válcovaného pásu za studena vyrobeného z Al99,5 (99,5 % hliníku). V průběhu experimentů byla měněna vzdálenost od výstupu trysky ke vzorku ($L = 30 - 90$ [mm]). V tab. 7.2 jsou uvedeny zprůměrované hodnoty parametrů Ra , Rq , Rz ve vztahu ke vzdálenosti L . Tyto parametry jsou následně graficky znázorněny na obr. 7.8, 7.9, 7.10, kde závislost drsnosti povrchu na vzdálenosti trysky od povrchu materiálu v rozsahu $L = 30-80$ [mm] je popsána rovnicemi lineární regrese s hodnotou spolehlivosti R^2 .

Seznam použitých pramenů

- [1] BOUŠKA, V., KAŠPAR, P. *Speciální optické metody*. Praha: Academia, 1983, 198 s.
- [2] BUMBÁLEK, B., ODVODY, V., OŠŤÁDAL, B.: *Drsnost povrchu*. Praha, SNTL 1989.
- [3] ČSN EN ISO 4287:1997. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha : Český normalizační institut, 1999. 24 s.
- [4] ČSN EN ISO 4288:1996. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. Praha : Český normalizační institut, 1999. 16 s.
- [5] FOLDYNA, J. Rozvoj technologie pulsujících vodních paprsků. In *Sborník příspěvků mezin. konf. Vodní paprsek/Water Jet 2009[CD]*, ÚGN 2009, pp. 48 - 63, ISBN 978-80-86407-81-4.
- [6] FOLDYNA, J., L. SITEK, J. SCUČKA, P. MARTINEC, J. VALICEK, and K. PALENIKOVA. 'Effects of Pulsating Water Jet Impact on Aluminium Surface', *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 209, No. 20, 6174-6180, 2009.
- [7] HLAVÁČEK, P. *Měření distribuce výškových a podélných fluktuací povrchu kovových materiálů vytvořených abrazivním vodním paprskem a jejich analýza: bakalářská práce*. FS VŠB-TUO, Ostrava, 2007, 55 s.
- [8] KLICH, J. *Analýza a komparace drsnosti povrchu vytvořených abrazivním vodním paprskem z hlediska různých postupových rychlostí: bakalářská práce*. Ostrava: FS VŠB-TU, 2007, 37 s
- [9] KLICH, J. *Vliv posuvné rychlosti řezné hlavy na hlavní geometrické parametry povrchu vytvořeného hydroabrazivním dělením: diplomová práce*. Ostrava: VŠB-TUO, Ostrava, 2009, 55 s.
- [10] KLICHOVÁ, D. *Návrh databanky pro predikci parametrů hydroabrazivního dělení materiálů: diplomová práce*. Ostrava: VŠB-TUO, Ostrava, 2009, 50 s.
- [11] KRAJNÝ, Z.: *Vodný lúč v praxi*. Bratislava: Miroslav Mračko. 1998, 384 s. ISBN 80-8057-091-4
- [12] SITEK, L. *Analýza procesu rozpojování hornin vysokorychlostními vodními paprsky na základě laboratorních měření. Disertační práce*. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta strojní, 2000, 110 s.

- [13] TICHÁ, Š.: *Strojírenská metrologie část 1*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2004. 112 s. ISBN 80-248-0672-X.
- [14] VALÍČEK, J.: *Snímání kvality povrchu materiálu pro řízení technologie kapalinového paprsku: doktorská práce*. Ostrava: VŠB-TUO, Institut fyziky, 2003, 92 s.
- [15] VALÍČEK, J. *Měření a řízení jakosti povrchu při hydroabrazivním dělení materiálu: habilitační práce*, Institut fyziky HGF VŠB-TUO, Ostrava, 2008, 116 s.
- [16] VASILKO, K., KMEC, J.: *Delenie materiálu: Teória a technológia*. Prešov: DATAPRES, 2003. 232 s. ISBN 80-7099-903-9
- [17] VESELÝ, R. *Řezání materiálu vodním paprskem: bakalářská práce*. Brno: VUT, Brno 2008, 44 s.
- [18] [30.4.2011, 18:00]. Dostupné na WWW: <<http://www.directindustry.com/prod/calder-pressure-systems/process-piston-pumps-40447-377462.html>>
- [19] [30.4.2011, 18:30]. Dostupné na WWW: <<http://www.weber-ultrasonics.de/index.php?id=245>>
- [20] [30.4.2011, 18:10]. Dostupné na WWW: <http://www.cougarcleaning.com/home/index.php?option=com_productbook&func=detail&Itemid=3&id=40>
- [21] [30.4.2011, 18:20]. Dostupné na WWW: <http://www.ptv.cz/ptv/jnp/cz/produkty/xyc_stoly/WJxyy_nZ_D/index.html>